Jan Krawiec
II rok SS2 Logistyka, Logistyka systemów produkcyjnych
Wydział Ekonomii, Finansów i Zarządzania
Uniwersytet Szczeciński

PROBLEMY ZARZĄDZANIA ODPADAMI RADIOAKTYWNYMI W ENERGETYCE JĄDROWEJ

Wstęp

W obliczu planowanego rozwoju energetyki jądrowej w Polsce zarządzanie odpadami radioaktywnymi staje się zagadnieniem kluczowym zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa środowiskowego, jak i zdrowia publicznego. Celem artykułu jest przedstawienie kompleksowego podejścia do procesów logistycznych związanych z odpadami radioaktywnymi, obejmującego ich klasyfikację, kondycjonowanie, transport oraz długoterminowe składowanie. Artykuł ma charakter przeglądowy – oparto się na analizie wytycznych międzynarodowych (IAEA) oraz dokumentacji krajowej i zagranicznej. Praca ma na celu identyfikację czynników warunkujących bezpieczeństwo procesów przechowywania i unieszkodliwiania odpadów radioaktywnych, w szczególności w kontekście rozwijającego się sektora jądrowego w Polsce.

1. Klasyfikacja odpadów radioaktywnych

Właściwa klasyfikacja odpadów radioaktywnych stanowi fundament dla dalszych działań związanych z ich kondycjonowaniem, transportem i składowaniem. Przyjęcie kryteriów opartych na poziomie aktywności, czasie połowicznego rozpadu czy generowanym cieple umożliwia dobór odpowiednich technologii i minimalizację ryzyka skażenia środowiska. Odpady radioaktywne dzielą się na kilka głównych kategorii, zależnie od poziomu aktywności, czasu połowicznego rozpadu oraz generowanego ciepła. Najczęściej wyróżnia się:

- Odpady niskiej aktywności (LLW): Zawierają niewielkie ilości radionuklidów, głównie o krótkim czasie połowicznego rozpadu, co umożliwia ich przechowywanie w powierzchniowych składowiskach[1];
- Odpady średniej aktywności (ILW): Charakteryzują się wyższą zawarto-

1 IAEA, *Classification of Radioactive Waste, Safety Series No. 111–G–1.1*, IAEA Vienna 1994.

ścią radioaktywnych izotopów oraz niewielkim generowaniem ciepła, co wymaga zastosowania specjalistycznych systemów izolacji[2];
- Odpady wysokiej aktywności (HLW): Obejmują między innymi wypalone paliwo jądrowe, które generuje znaczne ilości ciepła i wymaga długoterminowego zabezpieczenia w głębokich, geologicznych składowiskach[3].

Prawidłowa klasyfikacja odpadów jest fundamentem dalszych etapów zarządzania nimi, takich jak kondycjonowanie czy transport. Umożliwia dobór odpowiednich technologii, co wpływa na minimalizację ryzyka skażenia środowiska oraz zdrowotnych skutków narażenia ludzi[4]. Oprócz podstawowego podziału na odpady niskiej (LLW), średniej (ILW) i wysokiej aktywności (HLW), warto dodać, że klasyfikacja odpadów radioaktywnych uwzględnia również inne kryteria, które wpływają na dobór metod ich przetwarzania i składowania. Międzynarodowe wytyczne, publikowane przez IAEA, wprowadzają dodatkowe kategorie, m.in.:
- Exempt Waste (EW): Odpady, których poziom radioaktywności jest tak niski, że nie stanowią zagrożenia dla zdrowia i środowiska, dlatego wyłączone są spod regulacji ochrony radiologicznej;
- Very Short Lived Waste (VSLW) oraz Very Low Level Waste (VLLW): Kategorie te obejmują odpady o bardzo krótkich okresach rozpadu lub bardzo niskiej aktywności, dla których wymagania dotyczące izolacji mogą być mniej rygorystyczne.

Dodatkowo, klasyfikacja uwzględnia pochodzenie odpadów. Odpady powstające w elektrowniach jądrowych zwykle charakteryzują się wyższą aktywnością niż te z sektorów medycznego, przemysłowego czy badawczego[5]. Istotnym kryterium jest także generowane ciepło – szczególnie w przypadku HLW, gdzie wysoka temperatura wpływa na projektowanie systemów

---

2 IAEA, *Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. WS–R–1*, IAEA, Vienna 1999.

3 IAEA, *Disposal of Radioactive Waste*, Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna 2011. URL: https://www.iaea.org/publications/8420/disposal-of-radioactive-waste (dostęp: 15.05.2025).

4 World Nuclear Association, *Radioactive Waste Management*, 2024. URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-waste-management.aspx (dostęp: 15.05.2025).

5 K. Ślizowski, L. Lankof, *Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce*, "Przegląd Geologiczny", 2009, vol. 57, nr 9, s. 822-838.

chłodzenia i metody składowania[67]. Kolejnym aspektem jest wymagany okres izolacji: odpady o krótkim czasie połowicznego rozpadu mogą być przechowywane przez stosunkowo krótki okres, podczas gdy odpady o długotrwałej aktywności wymagają izolacji sięgającej nawet tysięcy lat. Dzięki temu dobór technologii kondycjonowania i składowania można precyzyjnie dostosować do właściwości danego strumienia odpadów[8]. Procedury klasowania odpadów są systemem dynamicznym – wraz z postępem technologicznym i zmianami w przepisach kategorie ulegają modyfikacjom, co pozwala na ciągłe doskonalenie systemów zarządzania odpadami i optymalizację kosztów przy jednoczesnym podnoszeniu bezpieczeństwa.

2. Proponowane techniki kondycjonowania odpadów radioaktywnych

Kondycjonowanie odpadów polega na przekształceniu ich w formę stabilną chemicznie, fizycznie i radiologicznie, co umożliwia bezpieczny transport, magazynowanie i składowanie.

Stosowane metody:

- Immobilizacja: Odpady są zatapiane w matrycach cementowych, szklanych lub ceramicznych, co znacząco redukuje ryzyko migracji radionuklidów;
- Kompresja i brykietowanie: Stosowane głównie w przypadku odpadów stałych, zmniejszając ich objętość i ułatwiając transport oraz składowanie[9];
- Systemy chłodzenia: Szczególnie ważne przy HLW, gdzie generowane ciepło musi być efektywnie rozpraszane, aby zapobiec uszkodzeniom materiałów izolacyjnych.

Oprócz wyszczególnionych podstawowych metod kondycjonowania, takich jak immobilizacja w cementowych, szklanych lub ceramicznych matrycach, warto zwrócić uwagę na kilka dodatkowych aspektów i technologii, które wpływają na efektywność przetwarzania odpadów radioaktywnych:

- Witrifikacja:
  Proces ten polega na stopieniu mieszanki odpadowej w bardzo wysokiej temperaturze oraz szybkim schłodzeniu, co prowadzi do utworzenia

6 *Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. WS-R-1* (IAEA, 1999).

7 *Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. SSR-5* (IAEA, 2011).

8 *Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Reactors, IAEA-TECDOC-791* (IAEA, 1995).

9 K. Ślizowski, L. Lankof, *op.cit., s. 2.*

niekrystalicznego szkła. Witrifikacja jest uznawana za jedną z najtrwalszych metod kondycjonowania HLW, gdyż szkło charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością na degradację chemiczną i fizyczną, minimalizując migrację radionuklidów do środowiska[10];

- Bituminizacja:
  Metoda ta znajduje zastosowanie przede wszystkim przy odpadach ciekłych oraz w niektórych przypadkach odpadów stałych o niskiej zawartości wody. Bituminizacja polega na mieszaniu odpadu z bitumem, co skutkuje uzyskaniem stabilnej, mało przepuszczalnej formy. Tak przygotowany materiał charakteryzuje się dobrą izolacyjnością, co ogranicza ryzyko uwolnienia radionuklidów[11];
- Kompresja i brykietowanie:
  Techniki te pozwalają na znaczną redukcję objętości odpadów stałych, ułatwiając ich transport i składowanie. Poprzez fizyczne zagęszczenie materiału oraz formowanie brykietów, zmniejsza się powierzchnia narażona na czynniki zewnętrzne, co wpływa korzystnie na stabilność kondycjonowanej masy[12];
- Zaawansowane systemy chłodzenia:
  W przypadku odpadów o wysokiej aktywności, szczególnie HLW, kluczowe jest zastosowanie systemów umożliwiających efektywne odprowadzanie ciepła. Odpowiednio zaprojektowane systemy chłodzenia, zarówno w fazie transportu, jak i w składowaniu, pozwalają na utrzymanie stabilnych parametrów termicznych, co jest niezbędne dla zapewnienia długoterminowej integralności matryc kondycjonujących[13];
- Zintegrowane podejście technologiczne:
  Współczesne systemy kondycjonowania coraz częściej łączą kilka z wymienionych metod w celu optymalizacji procesu. Przykładowo, przed witrifikacją odpady mogą być poddane procesom suszenia i kompresji, co dodatkowo redukuje ich objętość i wpływa na jakość końcowego produktu. Takie zintegrowane podejście umożliwia osiągnięcie lepszych parametrów izolacyjnych i redukcję ryzyka środowiskowego. Dobór konkretnej technologii kondycjonowania zależy nie tylko od właściwości samego odpadu (takich jak rodzaj, poziom aktywności, zawartość wody

10 IAEA, *Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Reactors, IAEA-TECDOC-791*, 1995.

11 IAEA, *Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656*, 1992.

12 *Ibidem*.

13 NRC, *Spent Fuel Storage and Transportation Regulatory Guide 4.7*, 2005.

czy generowane ciepło), ale również od wymogów systemów transportu i składowania. Dzięki precyzyjnej ocenie tych parametrów możliwe jest opracowanie kompleksowego systemu zarządzania odpadami, który zapewnia bezpieczeństwo na wszystkich etapach – od przetwarzania, przez transport, aż po długoterminowe składowanie.

3. Transport i składowanie odpadów radioaktywnych

Transport odpadów radioaktywnych wymaga zastosowania specjalistycznych rozwiązań technicznych oraz rygorystycznych procedur organizacyjnych, aby zminimalizować ryzyko dla środowiska i zdrowia publicznego[14]. W trakcie transportu stosuje się systemy GPS oraz czujniki promieniowania, które umożliwiają bieżące monitorowanie stanu ładunku i trasy przewozu. Dzięki temu możliwe jest szybkie reagowanie w przypadku nieprzewidzianych zdarzeń. Transport odpadów radioaktywnych stanowi jeden z kluczowych elementów całego łańcucha zarządzania tymi materiałami, wymagając zastosowania specjalistycznych rozwiązań technicznych oraz rygorystycznych procedur organizacyjnych. Oprócz podstawowych informacji o stosowanych pojemnikach i systemach monitoringu, warto rozszerzyć temat o następujące aspekty:

- Rodzaje pojemników transportowych:
  Transport odpadów odbywa się przy użyciu różnych typów pojemników, które są klasyfikowane według norm międzynarodowych (np. pakiety typu A, B i C).
- Typ A – przeznaczony do transportu materiałów o niskiej radioaktywności, które nie generują dużego ciepła, spełniających standardowe wymagania transportowe;
- Typ B – stosowany do przewozu odpadów wysokiej aktywności, takich jak wypalone paliwo, gdzie wymagana jest dodatkowa ochrona przed ekstremalnymi warunkami (upadki, pożary, zanurzenie w wodzie);
- Typ C – dedykowany do transportu materiałów drogą lotniczą, gdzie szczególnie istotne są aspekty związane z lekką konstrukcją i odpornością na drgania[15].
- Regulacje i normy prawne:
  Transport odpadów radioaktywnych odbywa się zgodnie z międzynarodowymi i krajowymi regulacjami. IAEA opracowała szereg wytycznych dotyczących bezpiecznego transportu, takich jak Regulations for the Safe

---

14 F. Lange, J. Mairs, C. Niel, *Risk Associated with the Transport of Radioactive Materials in the Fuel Cycle,* Environmental Monitoring and Assessment, Springer, 2010.

15 IAEA, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Safety Series No. 6,* 1985.

Transport of Radioactive Materials, Safety Series No. 6 (1985). W krajach takich jak USA obowiązuje również Spent Fuel Storage and Transportation Regulatory Guide 4.7 (2005), który precyzuje szczegółowe wymagania techniczne i procedury postępowania w trakcie transportu[16].

- Systemy monitoringu i kontroli:
  Nowoczesne systemy transportowe wykorzystują zaawansowane technologie monitoringu, w tym systemy GPS oraz czujniki promieniowania, które pozwalają na bieżące śledzenie stanu pojemników i ich lokalizacji. W przypadku awarii lub zdarzeń nadzwyczajnych przewidziane są procedury awaryjne, umożliwiające natychmiastowe podjęcie działań naprawczych. Taki system pozwala na szybkie wykrycie nieprawidłowości i minimalizację potencjalnych zagrożeń dla środowiska oraz zdrowia ludzkiego[17].
- Multimodalność transportu:
  W zależności od odległości, rodzaju odpadu oraz infrastruktury, transport odpadów radioaktywnych może odbywać się przy użyciu różnych środków transportu – drogowego, kolejowego, morskiego czy lotniczego. Każdy z tych środków wiąże się z odrębnymi wymaganiami dotyczącymi opakowania, zabezpieczenia i monitoringu, co wymusza na operatorach stosowanie zintegrowanych systemów zarządzania transportem[18].
- Planowanie tras i ocena ryzyka:
  Kluczowym elementem transportu jest wybór optymalnych tras, które minimalizują ekspozycję ludności i środowiska na potencjalne zagrożenia. W tym celu przeprowadza się szczegółowe analizy ryzyka, uwzględniające zarówno czynniki techniczne (np. stan dróg, obecność przeszkód), jak i społeczno-ekonomiczne (np. gęstość zaludnienia na trasie). Wyniki tych analiz wpływają na opracowanie planów awaryjnych oraz procedur ewakuacyjnych w przypadku incydentów[19].
- Koordynacja międzynarodowa i współpraca:
  Transport odpadów radioaktywnych, szczególnie gdy przekracza granice państw, wymaga ścisłej współpracy między krajowymi organami regulacyjnymi oraz międzynarodowymi organizacjami, takimi jak IAEA. Wspólne standardy, szkolenia i wymiana doświadczeń przyczyniają się do podnoszenia poziomu bezpieczeństwa na całym świecie[20].

---

16 U.S. NRC, *Spent Fuel Storage and Transportation Regulatory Guide 4.7*, 2005.

17 IAEA, *Spent Fuel Storage and Transportation Regulatory Guide 4.7*, 2005.

18 World Nuclear Association, *Radioactive Waste Management*, 2024.

19 OECD Nuclear Energy Agency, *Shallow Land Disposal of Radioactive Waste: Reference Levels for the Acceptance of Long-lived Radionuclides*, OECD, Paris 1987.

20 IAEA, *The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F*, 1995.

Podsumowując, transport odpadów radioaktywnych opiera się na precyzyjnie określonych normach technicznych i prawnych, wykorzystaniu zaawansowanych technologii monitoringu oraz ścisłej koordynacji między instytucjami krajowymi i międzynarodowymi. Tylko takie zintegrowane podejście pozwala na bezpieczne przemieszczanie materiałów, których niewłaściwe zarządzanie mogłoby prowadzić do poważnych konsekwencji ekologicznych i zdrowotnych. Składowanie odpadów radioaktywnych jest kluczowym etapem systemu zarządzania, mającym na celu trwałą izolację odpadów od biosfery i minimalizację ryzyka migracji radionuklidów. Wyróżnia się dwa główne rodzaje składowania:

- Składowanie pośrednie: Tymczasowe magazynowanie odpadów, często stosowane w przypadku HLW, umożliwiające schłodzenie wypalonego paliwa przed ostatecznym składowaniem;
- Składowanie końcowe: Ostateczne umieszczenie odpadów w głębokich, geologicznych formacjach. Proces ten opiera się na metodzie wielobarierowej, która łączy bariery inżynieryjne i naturalne, gwarantując izolację odpadów przez tysiące lat.

Kluczowym elementem składowania jest systematyczne monitorowanie stanu składowisk. Wdrażane są systemy czujników mierzących poziom promieniowania, parametry hydrogeologiczne oraz stan barier ochronnych. Post-closure monitoring, obejmujący aktywne i pasywne kontrole, ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa przez cały okres izolacji odpadów. Składowanie odpadów radioaktywnych to ostateczny etap całego systemu zarządzania odpadami, którego celem jest zapewnienie trwałej izolacji odpadów od biosfery, minimalizując ryzyko ich migracji do środowiska przez tysiące, a nawet setki tysięcy lat.

- Składowanie pośrednie:
  To tymczasowe rozwiązanie, stosowane przede wszystkim w przypadku odpadów wysokiej aktywności, takich jak wypalone paliwo jądrowe. W fazie pośredniej odpady są przechowywane w specjalnie zaprojektowanych, bezpiecznych magazynach (np. suche składowiska czy baseny chłodzące). Taki etap pozwala na schłodzenie materiału i redukcję generowanego ciepła, co jest kluczowe przed ostatecznym składowaniem[21];
- Składowanie końcowe (repozytoria geologiczne):
  Ostateczne składowanie polega na umieszczeniu kondycjonowanych odpadów w głębokich, geologicznych formacjach. Podejście to, znane jako metoda wielobarierowa, łączy bariery inżynieryjne (np. wytrzymałe kontenery, warstwy bentonitu czy cementu) z naturalnymi właściwościami terenu,

21 IAEA, *Storage of Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-653*, IAEA, Vienna 1992.

takimi jak niska przepuszczalność i stabilność geologiczna. Dzięki temu system ten ma na celu izolację odpadów przez okres setek tysięcy lat, aż do momentu, gdy ich aktywność spadnie do poziomów nieszkodliwych[22];

- Post-closure monitoring i instytucjonalne kontrole:
  Po zamknięciu składowiska konieczne jest wdrożenie długoterminowego systemu monitoringu, który obejmuje zarówno aktywne, jak i pasywne metody kontroli. Aktywne systemy to np. sieci czujników mierzących poziom promieniowania oraz parametry hydrogeologiczne, natomiast pasywne kontrole obejmują ograniczenia w zagospodarowaniu terenu, trwałe oznaczenia informacyjne oraz systemy rejestracji, które mają zapobiegać przypadkowemu naruszeniu repozytorium przez przyszłe pokolenia[23];
- Aspekty regulacyjne i międzynarodowe standardy:
  Składowanie odpadów odbywa się zgodnie z rygorystycznymi normami międzynarodowymi, m.in. wytycznymi IAEA zawartymi w Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. SSR-5 oraz w dokumentach dotyczących monitoringu po zamknięciu, jak Safety Guide WS-G-1.1. Te dokumenty określają zarówno wymagania techniczne, jak i procedury operacyjne, które muszą być przestrzegane, aby zapewnić bezpieczeństwo przez cały okres eksploatacji i po jej zakończeniu;
- Optymalizacja systemu składowania:
  Dobór technologii składowania zależy od specyficznych właściwości odpadów – ich rodzaju, poziomu aktywności, ilości generowanego ciepła oraz charakterystyki geologicznej terenu. W niektórych przypadkach stosuje się rozwiązania hybrydowe, które łączą składowanie pośrednie z końcowym, umożliwiając stopniowe przejście od jednego etapu do drugiego oraz dostosowanie systemu do zmieniających się warunków[24].

Podsumowanie

Bezpieczeństwo składowisk odpadów radioaktywnych buduje się nie tylko na bazie technologii, ale również poprzez transparentność i udział społeczeństwa w procesie decyzyjnym. Publiczne konsultacje, raporty oraz stały dostęp do informacji zwiększają zaufanie społeczne do stosowanych rozwiązań. Publiczny nadzór i udział stanowią nieodłączny element systemu zarządzania

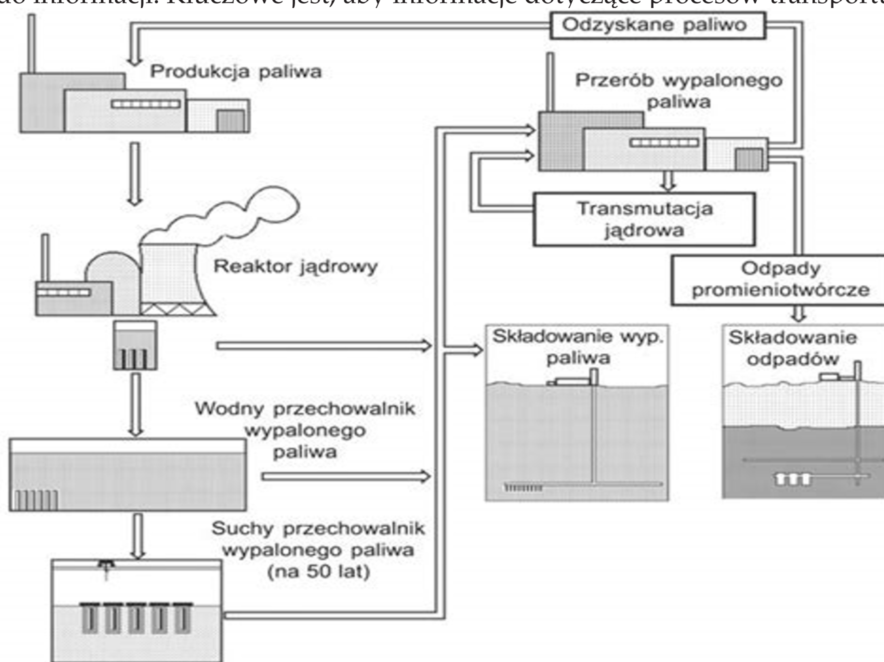
---

22 IAEA, *Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. SSR-5*, IAEA, Vienna 2011.

23 IAEA, *Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Guide No. WS-G-1.1*, IAEA, Vienna 1999.

24 IAEA, *Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Reactors, IAEA-TEC-DOC-791*, IAEA, Vienna 1995.

odpadami radioaktywnymi. Transparentność działań oraz otwartość na konsultacje społeczne zwiększają zaufanie obywateli do przyjętych rozwiązań, co ma kluczowe znaczenie dla akceptacji długoterminowych projektów składowania odpadów. W ramach tego podejścia bardzo ważna jest transparentność i dostęp do informacji. Kluczowe jest, aby informacje dotyczące procesów transportu,



Rysunek 1. Proces zarządzania odpadami radioaktywnymi

Źródło: Opracowanie na podstawie wytycznych IAEA oraz Ł. Zaboklicki, K. Garbulewski, *Metody unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych z elektrowni atomowych,* "Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska", 2012, nr 58, s. 303–315.

kondycjonowania i składowania odpadów były łatwo dostępne dla społeczeństwa. Publikowanie raportów, wyników monitoringu oraz wyników analiz ryzyka umożliwia obywatelom śledzenie stanu bezpieczeństwa oraz wprowadzonych zabezpieczeń. Dostępność danych buduje zaufanie oraz umożliwia niezależne oceny przeprowadzane przez ekspertów zewnętrznych. Zaangażowanie społeczeństwa w proces decyzyjny, w tym organizowanie publicznych konsultacji, pozwala na zebranie cennych opinii i sugestii. Włączenie lokalnych społeczności, które mogą być bezpośrednio dotknięte planowanymi przedsięwzięciami, jest ważnym elementem strategii zarządzania ryzykiem. Proces ten umożliwia dostosowanie planów do lokalnych uwarunkowań oraz oczekiwań społecznych. Prowadzenie kampanii informacyjnych, organizowanie szkoleń

oraz publikowanie materiałów edukacyjnych na temat zagrożeń związanych z odpadami radioaktywnymi i metod ich bezpiecznego zarządzania jest kluczowe. Takie działania pomagają wyjaśnić techniczne aspekty projektów oraz uzasadnić przyjęte środki bezpieczeństwa, co jest niezbędne dla podniesienia świadomości społecznej i budowania kompetencji wśród decydentów lokalnych. Nadzór instytucjonalny przez niezależne organy, takie jak komisje ds. bezpieczeństwa nuklearnego czy organy regulacyjne, zapewnia, że wszystkie etapy zarządzania odpadami są zgodne z międzynarodowymi normami i wytycznymi. Włączenie przedstawicieli społeczeństwa do tych organów lub tworzenie paneli doradczych, w których uczestniczą eksperci niezależni, dodatkowo zwiększa wiarygodność i obiektywność ocen. Publiczny nadzór i udział są fundamentem, na którym opiera się akceptacja społeczna dla przedsięwzięć związanych z zarządzaniem odpadami radioaktywnymi. Otwartość, transparentność oraz aktywna komunikacja z lokalnymi społecznościami umożliwiają lepsze dostosowanie rozwiązań technologicznych do rzeczywistych potrzeb i oczekiwań, a także wspierają budowanie długoterminowego zaufania do stosowanych systemów bezpieczeństwa. Analiza literatury i wytycznych międzynarodowych wskazuje, że skuteczne zarządzanie odpadami radioaktywnymi wymaga interdyscyplinarnego podejścia, obejmującego: precyzyjną klasyfikację, zaawansowane techniki kondycjonowania, bezpieczny transport oraz długoterminowe składowanie i monitoring. Efektywność systemu zależy od przestrzegania norm IAEA oraz transparentności działań i zaangażowania społeczeństwa. Tylko zintegrowane podejście pozwala na minimalizację ryzyka skażenia środowiska i zapewnienie bezpieczeństwa publicznego.

Bibliografia

Czop M., Motyka J., Sracek O., Szuwarzyński M., *Geochemistry of the Hyperalkaline Gorka Pit Lake (pH>13) in the Chrzanów Region*, Southern Poland, Environmental Geochemistry and Health, Springer, 2010.

Hughes J.S., Harvey M.P., *A Survey into the Radiological Impact of the Natural Transport of Radiological Material by Sea*, HPA-RPD-050, 2009.

International Atomic Energy Agency, *Classification of Radioactive Waste,* Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna 1994.

International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Waste,* Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna 2011. URL: https://www.iaea.org/publications/8420/disposal-of-radioactive-waste.

International Atomic Energy Agency, *Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes*, IAEA-TECDOC-654, IAEA, Vienna 1992.

International Atomic Energy Agency, *Improved Cement Solidification of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes*, Technical Reports Series No. 350, IAEA, Vienna 1993.

International Atomic Energy Agency, *Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Reactors*, IAEA-TECDOC-791, IAEA, Vienna 1995.
International Atomic Energy Agency, *Near Surface Disposal of Radioactive Waste*, Safety Standards Series No. WS-R-1, IAEA, Vienna 1999.
International Atomic Energy Agency, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials*, Safety Series No. 6, IAEA, Vienna 1985.
International Atomic Energy Agency, *Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste*, Safety Guide No. WS-G-1.1, IAEA, Vienna 1999.
International Atomic Energy Agency, *Spent Fuel Storage and Transportation*, NRC Regulatory Guide 4.7, 2005.
International Atomic Energy Agency, *Storage of Radioactive Wastes*, IAEA-TECDOC-653, IAEA, Vienna 1992.
International Atomic Energy Agency, *The Principles of Radioactive Waste Management*, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna 1995. URL: https://www.iaea.org/topics/radioactive-waste-and-spent-fuel-management.
International Atomic Energy Agency, *Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes*, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna 1992.
Lange F., Mairs J., Niel C., *Risk Associated with the Transport of Radioactive Materials in the Fuel Cycle*, Environmental Monitoring and Assessment, Springer, 2010.
OECD Nuclear Energy Agency, *Shallow Land Disposal of Radioactive Waste: Reference Levels for the Acceptance of Long-lived Radionuclides*, OECD, Paris 1987.
L.D Ordoñez, Schweitzer M.E., Galinsky A.D., Bazerman M.H., *Goals Gone Wild: The Systematic Side Effects of Overprescribing Goal Setting*, Harvard Business School Working Paper No. 09-083, 2009.
Pietrzyk-Sokulska E., Kulczycka J., *Impact of Landfilling of Red Mud Waste on Local Environment – the Case of Górka*, "Archives of Environmental Protection", 2013, Vol. 39, No. 3.
Rzymkowski K., *Transport materiałów jądrowych*, BJOR PAA, Nr 1–2 (115), Warszawa, 2018.
Shuman N.M., *Hazardous Waste Management – Reuse, Recycling and Reclamation,* Student Member ASCE, Proceedings of the Waste Management Symposium, 2016.
Ślizowski K., Lankof L., *Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce*, "Przegląd Geologiczny", 2009, vol. 57, nr 9.
Nuclear U.S. Regulatory Commission, *Spent Fuel Storage and Transportation Regulatory Guide 4.7*, NRC, USA, 2005. URL: https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/reg-guides.
World Nuclear Association, *Radioactive Waste Management, 2024.* URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-waste-management.aspx.
World Nuclear Association, *Transport of Radioactive Materials, Update 2017*. URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/transport-of-nuclear-materials/transport-of-radioactive-materials.aspx.

Streszczenie

Niniejszy artykuł prezentuje skróconą analizę zagadnień związanych z zarządzaniem odpadami radioaktywnymi w energetyce jądrowej. Omówiono klasyfikację odpadów na podstawie poziomu aktywności, metody kondycjonowania, wymagania techniczne transportu oraz systemy składowania i długoterminowego monitoringu. Praca podkreśla znaczenie wdrożenia międzynarodowych standardów bezpieczeństwa oraz ciągłego rozwoju technologii, co ma na celu minimalizację ryzyka ekologicznego i zdrowotnego.
Słowa kluczowe: odpady radioaktywne, kondycjonowanie, transport, składowanie, monitoring.

Summary

MANAGEMENT OF RADIOACTIVE WASTE IN NUCLEAR ENERGY

This paper presents a concise analysis of radioactive waste management in nuclear energy. It discusses the classification of waste by activity level, conditioning methods, technical requirements for transport, and systems for storage and long-term monitoring. The paper emphasizes the importance of implementing international safety standards and continuous technological advancement to minimize ecological and health risks.

Keywords: radioactive waste, conditioning, transport, storage, monitoring.